



Using linear programming in balanced food design at minimum cost for cattle

Maria Eugenia O'Farrill¹

¹ Universidad Central de Las Villas (UCLV). Carretera a Camajuaní, Km 5.5. Santa Clara. Villa Clara. Cuba.

Email: ofarrill@uclv.edu.cu

Received: April 11th, 2018

Accepted: May 23th, 2018

Published: June 30th, 2018

Copyright ©2016 by authors and Institute of Technology Galileo of Amazon (ITEGAM).

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International

License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



ABSTRACT

Precision in ration formulation is important to achieve a proper balance of nutrients in the production of concentrate at the lowest possible cost in order to get a good food production and reproductive performance. Currently, there are many programs ration formulation, which in some cases are expensive. The SOLVER tool Microsoft Excel for Windows is an easy and flexible process management, whose main advantage is that is available in the vast majority of computers working under Windows platform. The aim of this paper is to present the development of a linear programming model for ration formulation using the SOLVER process through a practical example step by step describes the construction of the model and the equations that result in the formulation of food rations four categories of animals within the cattle line, ensuring that each formulation meets the established nutritional requirements at minimum cost.

Key words: Linear programming, balanced food.

Empleo de la programación lineal en el diseño de alimentos balanceados de costo mínimo para ganado bovino

RESUMEN

La precisión en la formulación de raciones es importante para lograr un balance adecuado de los nutrientes en la fabricación de alimentos concentrados al menor costo posible, con el fin de obtener un buen rendimiento productivo y reproductivo. En la actualidad, existen numerosos programas de formulación de raciones, que en algunos casos resultan costosos. La herramienta SOLVER de Microsoft Excel® para Windows® es un procedimiento de fácil y flexible manejo, cuya ventaja principal es que está disponible en la gran mayoría de computadores que trabajan bajo la plataforma Windows®. El objetivo de este trabajo es presentar el desarrollo de un modelo de programación lineal para la formulación de raciones utilizando el procedimiento SOLVER mediante un ejemplo práctico se describe paso a paso la construcción del modelo y las ecuaciones que dan lugar a la formulación de raciones alimenticias para cuatro categorías de animales dentro de la línea de bovinos, garantizándose que cada formulación satisfaga los requerimientos nutricionales establecidos, a un mínimo costo.

Palabras clave: Programación lineal, alimentos balanceados.

I. INTRODUCCIÓN

La nutrición es importante sobre todo en el desempeño del ganado. Una dieta bien balanceada y un manejo adecuado optimizan la producción, la reproducción y la salud de los animales. Para cubrir las necesidades nutricionales para el ganado bovino, se debe garantizar que las raciones de alimentos incluyan agua, materia seca, proteínas, fibras, vitaminas y minerales en cantidades suficientes y bien balanceadas, considerando además el costo de la ración de alimento, por lo que el nutricionista debe recomendar la ración de menor costo en función de sus cálculos

de balanceo nutricional, el que por lo general calcula usando un procedimiento sistemático de tanteos [1].

Entre los programas para la formulación de raciones, la herramienta SOLVER de Microsoft Excel para Windows es uno de los procedimientos de fácil y flexible manejo, cuya ventaja principal es que está disponible en la mayoría de las computadoras [2-3]. Esta herramienta permite obtener un modelo de programación lineal que tenga como función objetivo la minimización de los costos del alimento balanceado, y que considere las restricciones nutricionales de los animales.

En el estado de Anzoátegui, en la ciudad Pariaguán, existe la planta agroindustrial de Alimentos Balanceados Para Animales, ALCOPA. En el proceso de elaboración de los alimentos que se realizan en esta fábrica, la disponibilidad y el precio de las materias primas, son factores que tienen una marcada incidencia en los costos de producción debido a su dinámica, razón por la que para esta industria resulta interesante realizar un análisis de ambos criterios, según el vínculo que estos tienen con las recetas a elaborar, teniendo en cuenta además el tipo de ganado que se quiere alimentar. Dentro de la línea de bovinos que representa el 25% de la producción total de la fábrica, se caracterizan cuatro categorías atendiendo a la concentración proteica requerida por los bovinos, denominadas a continuación: [4].

- Mantenimiento con un 10% de concentración proteica.
- Ceba con un 14% de concentración proteica.
- Lechero con un 18% de concentración proteica.
- Lechero con un 20% de concentración proteica.

Por lo anterior el objetivo de este trabajo está dirigido a formular raciones alimenticias para ganado bovino, a un mínimo costo que satisfagan los requerimientos nutricionales establecidos, empleando el SOLVER como herramienta computacional.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

II.1 PROCEDIMIENTO PARA LA FORMULACIÓN DEL MODELO DE PROGRAMACIÓN LINEAL PARA UNA CATEGORÍA, ATENDIENDO A LA CONCENTRACIÓN PROTEICA REQUERIDA

Se dedujo el modelo de Tarje Hansen [5] que versa sobre la proporción de mezcla alimenticia que cumpla con los requerimientos nutricionales del animal y a un costo mínimo.

Paso 1. Variables de decisión.

Se designa por x_j la cantidad, en kilogramos, que se debe utilizar del ingrediente j ($j=1, 2, 3, \dots, n$), estas son las variables de decisión y que por la naturaleza del problema toman valores no negativos.

Paso 2. Función objetivo.

El modelo debe proporcionar el costo mínimo de la ración preparada. Si x_1 es la cantidad, en kilogramos, del ingrediente 1, entonces el costo de ese ingrediente es p_1x_1 . De manera similar, el costo de comprar x_2 kilogramos del ingrediente 2 es p_2x_2 . En general, si el costo de comprar x_j kilogramos del ingrediente j es p_jx_j , entonces si se designa por Z el costo total de la ración, se tiene que:

$$Z = p_1x_1 + p_2x_2 + \dots + p_nx_n \quad (1)$$

Como lo que se desea es obtener el costo total mínimo, entonces la función objetivo es:

$$\text{Minimizar } Z = p_1x_1 + p_2x_2 + \dots + p_nx_n; \quad (2)$$

Paso 3. Restricciones.

Como se desea preparar 500 kilogramos de ración alimenticia, debe cumplirse que la suma de las cantidades de cada uno de los ingredientes de ración sea igual a 500.

$$\sum_{j=1}^n x_j = 500 \quad (3)$$

Se establece las limitaciones inherentes a lo establecido por las normas en cuanto a la composición bromatológica que debe cumplir la formulación teniendo en cuenta la categoría de bovino, objeto de estudio, según la norma COVENIN 1883-83 [4]. Considerando que a_{ij} es la cantidad de nutriente i presente en un kilogramo del ingrediente j y que la cantidad máxima y mínima permisible de nutriente i en un kilogramo del alimento animal es $b_{i,\max}$ y $b_{i,\min}$ respectivamente, se plantean las siguientes ecuaciones para expresar las restricciones:

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n &\leq b_{1,\min} \\ a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n &\leq b_{1,\max} \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n &\leq b_{2,\min} \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n &\leq b_{2,\max} \\ &\vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n &\leq b_{m,\min} \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n &\leq b_{m,\max} \end{aligned} \quad (4)$$

En forma resumida estas ecuaciones se escriben

$$b_{i,\min} \leq \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j \leq b_{i,\max} \quad (5)$$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

Las variables de decisión, representadas por las cantidades de ingredientes, además de tomar valores no negativos, están condicionadas a las cantidades máximas x_j^{\max} , \max y mínimas x_j^{\min} , \min permisibles de los ingredientes j en un kilogramo del compuesto. Estas ecuaciones se escriben:

$$x_{j,\min} \leq x_j \leq x_{j,\max}; \quad (6)$$

$$j = 1, 2, \dots, n$$

El modelo formulado y adaptado a raciones experimentales probadas para el ganado bovino, viene dado por:

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{j=1}^n p_j x_j \quad (7)$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$b_{i,\min} \leq \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j \leq b_{i,\max} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^n x_j = 500 \quad (9)$$

$$x_{j,\min} \leq x_j \leq x_{j,\max}; \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

$$x_j \geq 0 \quad (11)$$

En el modelo se puede apreciar la inclusión de Z (costo total de la ración) en el miembro izquierdo de la función objetivo y de los requerimientos nutricionales (establecidos por las Normas COVENIN) en las restricciones.

A continuación se muestran un ejemplo de las formulaciones del alimento pertenecientes a las cuatro categorías de animales dentro de la línea de alimentos para bovinos, elaborado por la empresa ALCOPA, para producir 500 kg de alimento.

Tabla 1: Formulación del alimento para la categoría Mantenimiento 10%, elaborado por la empresa ALCOPA, para producir 500 kg de alimento.

Ingredientes	Porcentaje de uso del ingrediente en la Formulación	Composición bromatológica en la formulación			Cantidad de ingrediente en la Formulación	Costo del ingrediente en la formulación
	%	PB (%)	Grasa (%)	Fibra (%)	kg	Bs
Harina de Soya	9	3.96	0.135	0.675	45	247.50
Sorgo	27.85	2.6457	0.8355	0.696	139.25	463.70
Maíz	22	1.98	0.88	0.44	110	770.00
Arroz Pady	17	1.36	0.34	1.53	85	488.75
Cascarilla de Arroz	9	0.27	0	3.42	45	92.25
Melaza	10.95	0.438	0	0	54.75	657.00
BIO-FOS	2.15	0	0	0	10.75	161.25
Sal	1.55	0	0	0	7.75	23.25
Mix Ternero	0.5	0	0	0	2.5	5.13
Totales	100	10.65	2.19	6.76	500.00	2850.08
Valor Normado (COVENIN 1883-83)		Min 16%	Min 2%	Max 10%		

Fuente: Autor, (2018).

Se aprecia de la tabla anterior, que el alimento formulado actualmente no cumple con lo establecido por la norma, en lo referido al contenido de Proteína Bruta en la formulación, el cual como mínimo debe ser de un 16 % y actualmente no rebasa el 10.65 %.

Tabla 2: Formulación del alimento para la categoría Ceba 14%, elaborado por la empresa ALCOPA, para producir 500 kg de alimento.

Ingredientes	Porcentaje de uso del ingrediente en la Formulación	Composición bromatológica en la formulación			Cantidad de ingrediente en la Formulación	Costo del ingrediente en la formulación
	%	PB (%)	Grasa (%)	Fibra (%)	kg	Bs
Harina de Soya	18	7.92	0.27	1.35	90	495.00
Sorgo	27	2.565	0.81	0.675	135	449.55
Maíz	26.35	2.3715	1.054	0.527	131.75	922.25
Arroz Pady	10	0.8	0.2	0.9	50	287.50
Cascarilla de Arroz	4.5	0.135	0	1.71	22.5	46.13
Melaza	10	0.4	0	0	50	600.00
BIO-FOS	2.1	0	0	0	10.5	157.50
Sal	1.55	0	0	0	7.75	23.25
Mix Ternero	0.5	0	0	0	2.5	5.13
Totales	100	14.19	2.33	5.16	500.00	2986.30
Valor Normado (COVENIN 1883-83)		Min 16%	Min 2%	Max 10%		

Fuente: Autor, (2018).

Se aprecia de la tabla anterior, que el alimento formulado actualmente no cumple con lo establecido por la norma, en lo referido al contenido de Proteína Bruta en la formulación, el cual como mínimo debe ser de un 16 % y actualmente no rebasa el 14.19 %.

Tabla 3: Formulación del alimento para la categoría Lechero 18%, elaborado por la empresa ALCOPA, para producir 500 kg de alimento.

Ingredientes	Porcentaje de uso del ingrediente en la Formulación	Composición bromatológica en la formulación			Cantidad de ingrediente en la Formulación	Costo del ingrediente en la formulación
	%	PB (%)	Grasa (%)	Fibra (%)	kg	Bs
Harina de Soya	28.5	12.54	0.4275	2.137	142.5	1211.25
Sorgo	20.42	1.9399	0.6126	0.510	102.1	339.993
Maíz	20.6	1.854	0.824	0.412	103	566.5
Arroz Pady	6	0.48	0.12	0.54	30	210
Harina de arroz	8	0.96	1.44	1.6	40	186
Cascarilla de Arroz	4.5	0.135	0	1.71	22.5	46.125
Melaza	7.7	0.308	0	0	38.5	103.95
BIO-FOS	2.02	0	0	0	10.1	76.053
Sal	1.76	0	0	0	8.8	18.04
Mix Vaca Lechera	0.5	0	0	0	2.5	10.75
Totales	100	18.22	3.42	6.91	500.00	2768.66
Valor Normado (COVENIN 1883-83)		Min 18%	Min 2%	Max 7%		

Fuente: Autor, (2018).

Se aprecia de la tabla anterior, que el alimento formulado actualmente cumple con lo establecido por la norma, en lo referido al contenido de Proteína Bruta, Grasa y Fibra en la formulación.

Tabla 4: Formulación del alimento para la categoría Lechero 20%, elaborado por la empresa ALCOPA, para producir 500 kg de alimento

Ingredientes	Porcentaje de uso del ingrediente en la Formulación	Composición bromatológica en la formulación			Cantidad de ingrediente en la Formulación	Costo del ingrediente en la formulación
	%	PB (%)	Grasa (%)	Fibra (%)	kg	Bs
Harina de Soya	34	14.96	0.51	2.55	170	1445
Sorgo	20.42	1.9399	0.6126	0.510	102.1	339.993
Maíz	18	1.62	0.72	0.36	90	495
Arroz Pady	2	0.16	0.04	0.18	10	70
Harina de arroz	14	1.68	2.52	2.8	70	325.5
Cascarilla de Arroz	1.5	0.045	0	0.57	7.5	15.375
Melaza	4.2	0.168	0	0	21	56.7
BIO-FOS	2.02	0	0	0	10.1	76.053
Carbonato de Calcio	1.6	0	0	0	8	24
Sal	1.76	0	0	0	8.8	18.04
Mix Vaca Lechera	0.5	0	0	0	2.5	10.75
Totales	100	20.57	4.40	6.97	500.00	2876.41
Valor Normado (COVENIN 1883-83)		Min 18%	Min 2%	Max 7%		

Fuente: Autor, (2018).

Se aprecia de la tabla anterior, que el alimento formulado actualmente cumple con lo establecido por la norma, en lo referido al contenido de Proteína Bruta, Grasa y Fibra en la formulación. El productor dedicado a la cría de animales le interesa que las mezclas alimenticias preparadas, estén nutricionalmente balanceadas y al menor costo posible [1] [6].

Precisamente el modelo de programación lineal, a través del método Simplex, permite la confección de raciones de costo mínimo, el cual puede ser implementado en un software específico, donde es posible especificar las restricciones de cada ingrediente y nutriente [2] [7].

El modelo diseñado para este trabajo fue implementado para cada categoría de ganado bovino, objeto de estudio,

empleando la herramienta SOLVER de Microsoft Excel® para Windows® [1] [3] [8]. Los resultados alcanzados se muestran a continuación.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

III.1 REQUERIMIENTOS NUTRICIONALES Y COSTOS ALCANZADOS EN LA FORMULACIÓN OPTIMIZADA

PARA LA CATEGORÍA DE MANTENIMIENTO 10% (BASE:
500 KG DE ALIMENTO)

Tabla 5: Requerimientos nutricionales y costos alcanzados en la formulación optimizada para la categoría de Mantenimiento 10% (Base: 500 kg de alimento).

	Formulación Optimizada **	Formulación actual ***	Valor Normado (COVENIN188-83)
Contenido de Proteína bruta (%)	16	10.65	Mínimo 16%
Contenido de Grasa (%)	2.01	2.19	Mínimo 2%
Contenido de Fibra (%)	3.43	6.76	Máximo 10%
Costo de Formulación (Bs)	2422.39	2850.08	Ahorro: 427.69 (cada 500kg de alimento producido)

Fuente: Autor, (2018).

** Los valores obtenidos son los resultados que brinda el modelo de programación lineal con las restricciones fijadas, una vez procesado con la herramienta SOLVER de Microsoft EXCEL. El costo de la formulación optimizada es el valor que brinda la función objetivo una vez que concluye la optimización para obtener 500 kg de ración.

*** Son los valores reales que se obtuvieron al analizar las formulaciones actuales que se obtienen en la empresa ALCOPA.

III.2 RESULTADOS DE LA PROGRAMACIÓN LINEAL,
PARA OBTENER FORMULACIÓN ADECUADA, EN LA
CATEGORÍA DE CEBA CON UN 14% DE CONTENIDO
PROTEICO

Tabla 6: Requerimientos nutricionales y costos alcanzados en la formulación optimizada para la categoría de ceba 14% (Base: 500 kg de alimento).

	Formulación Optimizada **	Formulación actual ***	Valor Normado (COVENIN188-83)
Contenido de Proteína bruta (%)	16	14.19	Mínimo 16%
Contenido de Grasa (%)	2.65	2.33	Mínimo 2%
Contenido de Fibra (%)	4.00	5.16	Máximo 10%
Costo de Formulación (Bs)	2924.85	2986.30	Ahorro: 61.45 (cada 500kg de alimento producido)

Fuente: Autor, (2018).

** Los valores obtenidos son los resultados que brinda el modelo de programación lineal con las restricciones fijadas, una vez procesado con la herramienta SOLVER de Microsoft EXCEL. El costo de la formulación optimizada es el valor que brinda la función objetivo una vez que concluye la optimización para obtener 500 kg de ración.

*** Son los valores reales que se obtuvieron al analizar las formulaciones actuales que se obtienen en la empresa ALCOPA.

III.1 RESULTADOS DE LA PROGRAMACIÓN LINEAL,
PARA OBTENER FORMULACIÓN ADECUADA, EN LA
CATEGORÍA DE LECHERO CON UN 18% DE CONTENIDO
PROTEICO

Tabla 7: Requerimientos nutricionales y costos alcanzados en la formulación optimizada para la categoría de Lechero 18% (Base: 500 kg de alimento).

	Formulación Optimizada **	Formulación actual ***	Valor Normado (COVENIN188-83)
Contenido de Proteína bruta (%)	20.24	18.22	Mínimo 18%
Contenido de Grasa (%)	2.42	3.42	Mínimo 2%
Contenido de Fibra (%)	5.19	6.91	Máximo 7%
Costo de Formulación (Bs)	2594.83	2768.66	Ahorro: 173.83 (cada 500kg de alimento producido)

Fuente: Autor, (2018).

** Los valores obtenidos son los resultados que brinda el modelo de programación lineal con las restricciones fijadas, una vez procesado con la herramienta SOLVER de Microsoft EXCEL. El costo de la formulación optimizada es el valor que brinda la función objetivo una vez que concluye la optimización para obtener 500 kg de ración.

*** Son los valores reales que se obtuvieron al analizar las formulaciones actuales que se obtienen en la empresa ALCOPA.

III.4 RESULTADOS DE LA PROGRAMACIÓN LINEAL,
PARA OBTENER FORMULACIÓN ADECUADA, EN LA
CATEGORÍA DE LECHERO CON UN 20% DE CONTENIDO
PROTEICO

Tabla 8: Requerimientos nutricionales y costos alcanzados en la formulación optimizada para la categoría de Lechero 20% (Base: 500 kg de alimento).

	Formulación Optimizada **	Formulación actual ***	Valor Normado (COVENIN188-83)
Contenido de Proteína bruta (%)	27.09	20.57	Mínimo 18%
Contenido de Grasa (%)	3.52	4.40	Mínimo 2%
Contenido de Fibra (%)	6.48	6.97	Máximo 7%
Costo de Formulación (Bs)	2691.45	2876.41	Ahorro: 184.96 (cada 500kg de alimento producido)

** Los valores obtenidos son los resultados que brinda el modelo de programación lineal con las restricciones fijadas, una vez procesado con la herramienta SOLVER de Microsoft EXCEL. El costo de la formulación optimizada es el valor que brinda la función objetivo una vez que concluye la optimización para obtener 500 kg de ración.

*** Son los valores reales que se obtuvieron al analizar las formulaciones actuales que se obtienen en la empresa ALCOPA.

Como puede observarse en las tablas anteriores, las nuevas formulaciones cumplen con los requerimientos nutricionales establecidos para cada categoría de ganado bovino y se introducen ahorros por cada 500 kg de producción de alimento (batch

determinado por la capacidad del mezclador de la planta donde se produce la formulación). Resultado que implica un impacto económico.

IV. CONCLUSIONES

La utilización de la programación lineal a través del sub programa SOLVER del Tabulador Excel es ventajoso, pues permite cierta flexibilidad para describir alimentos y formular raciones prácticas y ajustadas a los requerimientos de ganado bovino.

La formulación de alimento para ganado bovino usando la programación lineal, favorece y eleva la productividad de la fábrica procesadora de alimentos, manteniendo los requerimientos nutricionales establecidos por las Normas COVENIN.

La versatilidad de la programación lineal permite la obtención de raciones a un costo mínimo y que sean compatibles con las características del ganado bovino

V. REFERENCIAS

- [1] Noguera, R. R., Posada, S. L., & Ortiz, D. M. (2011). **Programación lineal aplicada a la formulación de raciones par ruminantes**. *Revista CES Medicina Veterinaria Y Zootecnia*, 6(2), 53–60.
- [2] Faulín, J., & Juan, Á. A. (2012). **Programación Lineal y Programación Lineal Entera con MS-Excel y Lindo** (Vol. 1).
- [3] Márquez, E. (2006). **Formulación de un problema de programación lineal para la preparación de raciones alimenticias para ganado porcino**. Universidad Nacional Abierta.
- [4] COVENIN-Norma. (1983). **Norma Venezolana**. Alimentos para bovinos. Publicación de FONDONORMA. Ministerio de Fomento.
- [5] Balchen, J. (1981). *Applied Operations Research in Fishing*. (K. B. Haley, Ed.). Boston, MA: Springer US. <http://doi.org/10.1007/978-1-4613-3222-0>
- [6] Balaguer Ponsot, E., & Marquez, V. (2000). **Modelo de programación lineal de la producción, integrado en un sistema computarizado de producción, inventario y ventas industrial**. *Economía*, 16, 73–90. Retrieved from <ftp://iies.faces.ula.ve/Pdf/Revista16/Rev16Ponsot.pdf>
- [7] Rodríguez, N., & Pía, L. (2005). **Programación lineal multiobjetvo aplicada a la optimización de la producción de proteína humana recombinante en levadura**.
- [8] Eduardo, J., & Triviño, O. (2012). *Solución del Modelo de PL en Solver de Excel Organización de la Clase*. Colombia.
- [9] **Universidad de Chile**. Retrieved from [http://bibliotecadigital.uchile.cl/client/sisib/search/detailnonmodal/ent:\\$002f\\$002fSD_ILS\\$002f489\\$002fSD_ILS:489538/ada;jsessi onid=E37106C1C4DD7B169865093D8945F30C?qf=AUTHOR%09Author%09Universidad+de+Chile.+Departamento+de+Ingenier%C3%ADa+Qu%C3%ADmica.%0](http://bibliotecadigital.uchile.cl/client/sisib/search/detailnonmodal/ent:$002f$002fSD_ILS$002f489$002fSD_ILS:489538/ada;jsessi onid=E37106C1C4DD7B169865093D8945F30C?qf=AUTHOR%09Author%09Universidad+de+Chile.+Departamento+de+Ingenier%C3%ADa+Qu%C3%ADmica.%0)